

〔研究〕

高温超電導 SQUID HTS-SQUID

葛西直子 高島 浩 小柳正男
N. KASAI H. TAKASHIMA M. KOYANAGI

We have developed the bicrystal grain boundary junction technology and the multi-layer fabrication technology by using technologies of pulsed laser deposition (PLD) of high T_c superconducting films, photolithography, etching, and chemical-mechanical planarization. We fabricated the HTS-SQUID magnetometer using these technologies. We developed a system for non-destructive evaluation (NDE) based on the HTS-SQUID magnetometer and showed the possibility of NDE with metals and carbon fiber reinforced plastics of complex materials using the system.

§ 1 はじめに

超電導計測素子である SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) はフラックスゲート磁力計や半導体磁界素子、誘導コイルなど他の磁界計測素子にくらべて、磁界感度が非常に高いこと、またその感度が周波数に依存しないことなど現在、実用化されている他では代替できない性能を有している¹⁾。このため、SQUIDは脳機能疾患や心疾患の診断などに用いられる生体磁気計測装置のセンサとして利用されている²⁾。さらに安全管理や品質管理を目的とした材料の非破壊検査^{3,4)}やSQUID顕微鏡⁵⁾などのためのセンサとして期待されている。

しかし、従来の金属超電導体を用いた SQUID を動作させるためには、液体ヘリウムを用いるため、ランニングコストがかかる、取り扱いが難しい、周辺の装置が大型化するなどの問題点が避けられず、広く一般への普及を困難にしている。液体窒素温度で動作する高温超電導 SQUID の実現はこれらの問題点を大幅に改善することとなり、超電導素子応用の普及と発展にとって重要な鍵をにぎると考えられる。

そこで、77 K で動作する高温超電導 SQUID の開発を行うために、超電導薄膜作製とその加工技術を開発し、それらの技術を用いて SQUID の試作を行った。さらに高性能化を旨とした積層構造のデバイス作製をおこなうために、半導体研磨技術などに利用されている CMP 研磨を用いた積層構造技術の開発を行った。

§ 2 薄膜作製と加工技術

性能のよい SQUID を作製するためには、まず高品質な超電導薄膜を作製することが必要である。そこで高品質な超電導薄膜を得るために、パルスレーザー蒸着法 (PLD 法) による高品質超電導酸化物薄膜 YBCO、接合障壁薄膜 PBCO、絶縁薄膜 STO の作製技術を開発した。

その結果、超電導転移温度が 91K 程度、77K における臨界電流密度が $\sim 10^7$ A/cm²、室温と 100K における膜の比抵抗 $R(300\text{ K})/R(100\text{ K})$ が 3.3 の YBCO 薄膜が得られた。開発した YBCO 薄膜の高い結晶性を示す例として、Fig.1 に SrTiO₃ 上に形成した c 軸配向 YBCO 薄膜の典型的な X 線回折パターンにおける (005) と (0013) のピークの CuK α_1 と CuK α_2 によるピーク分離を示す。PBCO においても同

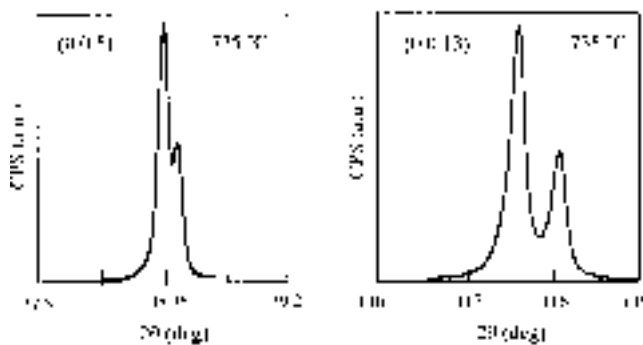


Fig.1 The X-ray diffraction patterns of (0 0 5) and (0 0 13) peaks of YBCO. The peak splittings by CuK α_1 and CuK α_2 are clearly appeared.

KEY WORDS : SQUID, 高温超伝導, 超伝導薄膜, バイクリスタル素子, 積層構造, CMP, 非破壊検査

様の結晶性が得られた。

SQUID を作製するための加工技術として、フォトリソグラフィ技術、イオンリング法、化学エッチング法を利用した薄膜加工技術を開発した。とくに、イオンリング装置においては、加工時の薄膜劣化を避けるために液体窒素冷却基板ホルダーを導入し、大幅な改善が得られた。

§ 3 ジョセフソン素子作製

SQUID の構成要素であるジョセフソン素子として、ランプエッジ(ramp-edge)型素子とバイクリスタル(bicrystal)基板を用いた粒界接合型素子の開発を行った。

開発を行った ramp-edge 型ジョセフソン素子は YBCO/PBCO/YBCO 構造とした。作製した素子特性のパラッキは、PBCO 薄膜の結晶性の高品質化と共に大きくなる傾向となった。このことから、ramp-edge 型ジョセフソン素子と異なり、小規模回路にしか適用できないという制約があるが、特性の良い粒界接合型 bicrystal ジョセフソン素子の開発を行うこととした。

bicrystal 基板は、Fig.2(a) に示したように 2 つの基板を結晶軸方向をずらせて接合したものである。この基板上に YBCO 薄膜を蒸着することにより、接合箇所粒塊の界

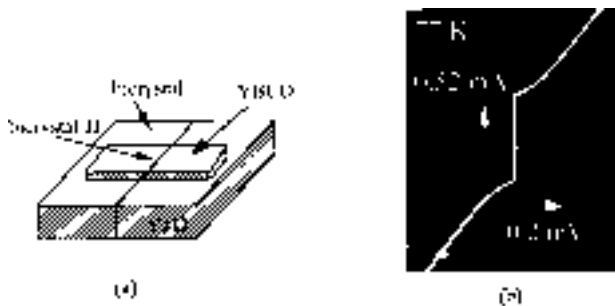


Fig.2 Bicrystal Josephson junction; schematic figure of bicrystal Josephson junction (a) and the current -voltage characteristic of a bicrystal JJ (b).

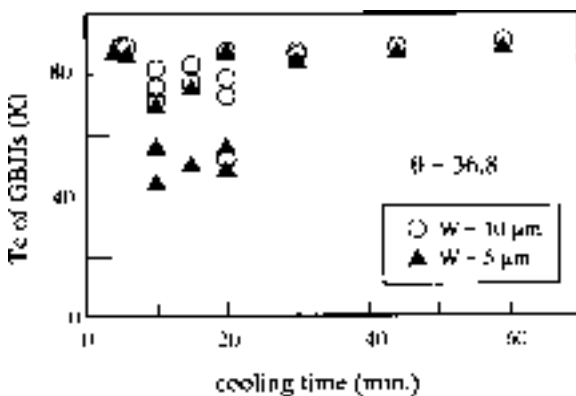


Fig.3 The effect of cooling time on the T_c of grain boundary Josephson junctions (GBJJs).

面が発生し、bicrystal 素子が作製される。作製した bicrystal 素子の 77 K における典型的な電流-電圧特性を Fig.2(b) に示す。素子作製時に、高温における薄膜蒸着後の冷却時間が素子特性に影響を及ぼすことが分った。Fig.3 に bicrystal 素子の特性と冷却速度の関係を示す。この図から素子の T_c が 90 K 近く、 $I_c R_n$ 積が 0.1 mV 以上の bicrystal 素子作製には、冷却時間を 40 分以上にすることが望ましいといえる。

このようにして、性能の良いジョセフソン素子を作製することが可能になった。

§ 4 平坦化技術

超電導回路と SQUID を集積化した磁気センサーなど酸化超電導薄膜を用いた積層構造を持つデバイスを作製するにあたり 3 つの問題が挙げられる。1 つ目は、YBCO などの超電導薄膜表面には、析出物による突起物や膜自体の平坦性の問題から、絶縁層を介したピンホールによる短絡が生じ、上下超電導膜間の絶縁抵抗が低下する。2 つ目は、下部層に作製されたパターンの段差を上層膜の細線が交差し crossover 構造を構成したときに、段差部で上層膜の結晶構造が崩れ、上層細線の超電導特性が低下する。3 つ目は絶縁層に人為的に接続用の穴を開け上下超電導膜間の接触をとる時に必要な超電導コンタクト(via 構造)である⁶⁾。これらの問題解消に向け、ion beam etching (IBE) を用いた方法^{7,8)}、シャドーマスクを用いて成膜時に緩やかな段差を作製する方法⁹⁾、Ar ion milling と HF を用いたエッチングによる段差の平坦化¹⁰⁾や、マスクを用いた研磨¹¹⁾などが用いられ現在までに報告されている。我々は、CMP(chemical mechanical polishing)研磨を用いて、YBCO / STO / YBCO 積層構造を作製した。また、同様のプロセスを用いて上下層間の超電導接続を確認するために、via 構造をもつ Multi-turn coil を作製し、超電導特性を測定した。

まず、crossover 構造を持つ積層構造の作製について述べる。Fig.4 に crossover 構造を持つ積層構造の作製プロセスを示す。はじめに STO(100) 単結晶基板の上に YBCO を 300nm と STO を 50nm 連続して育成し(a)、一般的なリソグラフィを用いたパターンニングの後、イオンリングを用いてエッチングを行い、下層膜に細線を形成する(b)。表面にレジストを塗り乾燥させ、基板の裏側についた銀ペーストを紙やすりを用いてきれいに削り取る。アセトンで超音波洗浄後、PLD によって STO を 600nm 育成し(c)、レジスト塗布、乾燥後、銀ペーストを紙やすりできれいに削り取る。サンプルをホルダーにエレクトロンワックスで固定した後、CMP によって 90 分間、約 400nm 削り、下部

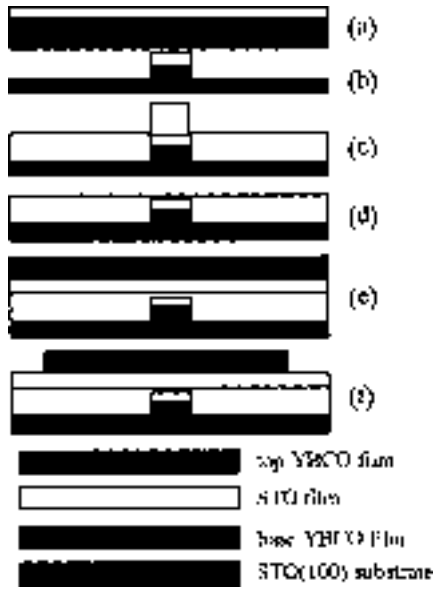


Fig.4 Fabrication process of crossover structure

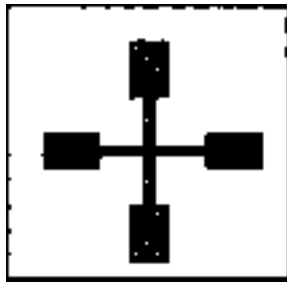


Fig.5 Crossover structure

層の平坦化を行う(d)。アセトンで超音波洗浄を行い，サンプル表面に付着した不純物をきれいに取り去り酸素圧400 mTorr，温度 600 で2時間熱処理を行う。この熱処理によってアモルファス化した結晶性が改善されたことがRHEED観測によって確認された。その後，PLDによってSTOを200nm育成し下部層からのピンホールによる短絡を断ち切り，YBCOを250nm育成する(e)。上層膜に下層細線と交差するようパターンニングを行い，イオンミリングでエッチングし上層膜に細線を形成する(f)。下層膜YBCOとの接続用にパターンニングを行い，上層膜YBCOは5% NHO_3 で，STOは5% HF を用いて湿式エッチングし接続用穴を作製する。上下のYBCO膜細線の配置をFig.5に示す。

Fig.6にCMP前後の，STO/YBCO bilayerのAFM像を示す。YBCO膜上に成長した析出物による突起は，CMP研磨によって高さで1/10，底面積で1/20と形状的に顕著に減少していることが分かる。Fig.7に crossover 構造のSEM写真と上下細線部における段差の測定結果を示す。上部YBCO細線は，絶縁層STOを介して下部YBCO細線

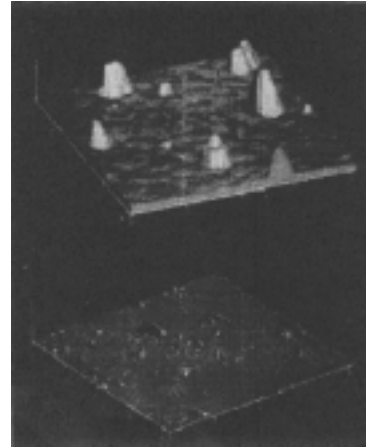


Fig.6 AFM images of the STO / YBCO bilayer ((a) without CMP , (b) with CMP)

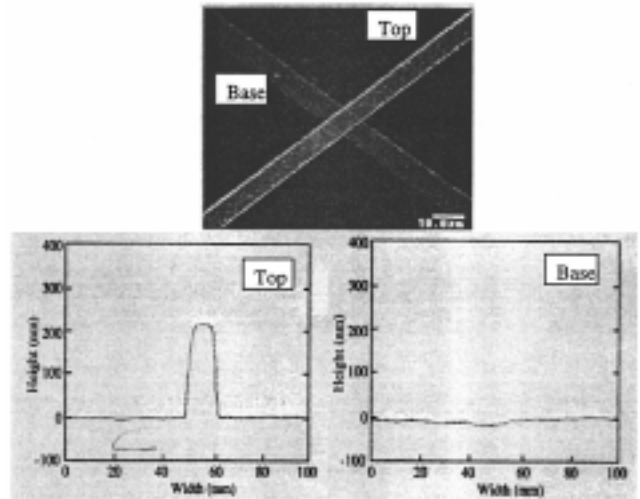


Fig.7 SEM photograph and profile structure of crossover

Table 1 crossover properties

polish time:	insulation	crossover properties	
	resistivity	J_c at 77 K (A/cm^2)	T_c (K)
17.30	$8.0 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	II	49
90.00	1×10^6	1×10^6	88%

と交差し，CMP研磨によって下層YBCO膜の細線のエッチングによってできた段差は完全に消滅している。Table 1にCMP研磨を行わないときの構造と，CMP研磨を90分を行い約400nm研磨した構造の特性を示す。77 Kにおける絶縁抵抗はCMP研磨の導入により1000倍に改善され，上下層YBCO膜間の電気的短絡が減少していることが分かる。また，Fig.8の絶縁抵抗率の温度依存性から，CMPプロセスの導入により転移温度付近での急激な減少がなく，絶縁体的な挙動を示し，上下層YBCO膜間の超電導的短絡が解消され良好な絶縁特性が得られた。上下層YBCO膜の超電導特性は， T_c ， J_c ともに88 K以上， $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$

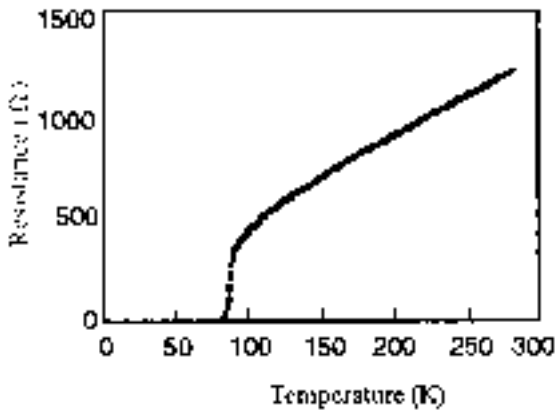


Fig.8 Resistance vs temperature of Multiturn coil

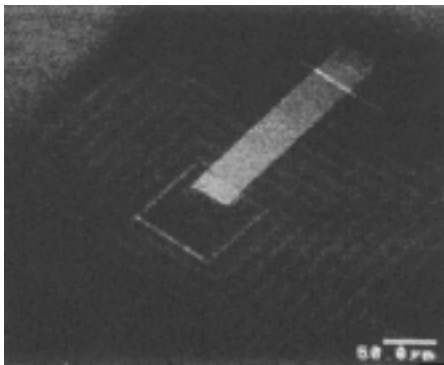


Fig.9 SEM photograph of the Multi-turn coil

の結果が得られ、段差交差部における超電導特性の低下は確認されず、段差が平坦化され上下層 YBCO 膜ともに良好な特性が得られた。

次に、multi-turn coilの作製について述べる。はじめに STO(100)単結晶基板上に YBCO を 300nm と STO を 50nm 連続して育成し、リソグラフィーを用いたパターンニングの後、イオンミリングを用いてエッチングを行い、下層膜に coil を形成する。表面にレジストを塗り乾燥させ、基板の裏側についた銀ペーストを紙やすりできれいに削り取る。アセトンで超音波洗浄後、PLD によって STO を 600nm 育成し、レジスト塗布、乾燥後、銀ペーストを紙やすりできれいに削り取る。サンプルをホルダーにエレクトロンワックスで固定した後、CMP によって 90 分間、約 400nm 削り、下部層の平坦化を行う。終了後、アセトンで超音波洗浄を行い、サンプル表面に付着した不純物をきれいに取り去った後、PLD によって STO を 200nm 育成する。この後、via 構造用のパターンニングを行った後、HF により STO 膜をエッチングし下部 YBCO の電極面を出す。イオンミリングでサンプル表面をクリーニングした後、熱処理を行い YBCO を 250nm 育成する。パターンニングの後、イオンミリングを用いて上層膜のエッチングを行い、multi-turn coil を作製した。

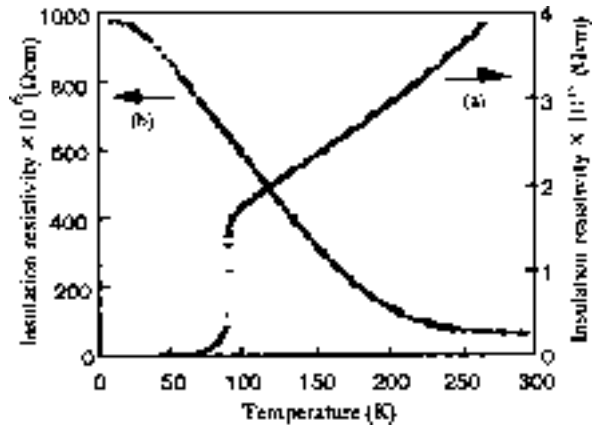


Fig.10 Insulation resistivity vs temperature ((a) without CMP , (b) with CMP)

作製した multi-turn coil の SEM 写真を Fig.9 に示す。上層膜の細線(写真中の白い幅広のライン)の両端部分に作製された via 構造によって下層の 8-turn coil と細線が超電導接続されている。上部 YBCO 細線には段差が見られず、CMP 研磨によってパターンニングによってできた下層の段差がほぼ消滅したことが分かる。この via 構造を介した上下 YBCO 膜 multiturn coil の温度依存性を Fig.10 に示す。臨界温度 T_c は 84 K であり、77 K での via 構造での臨界電流密度は 10^4 A/cm² であった。またこの電流値から計算した下部 coil 部の臨界電流密度は 10^6 A/cm² であった。

§ 5 SQUID 作製と非破壊検査応用

開発した高品質超電導薄膜作製技術を用いて、bicrystal 素子を利用した非破壊検査のための dc SQUID 磁束計を試作した。これまでに開発した薄膜作製技術では、積層構造を持つ SQUID を作製することが出来ないため第 1 段階として、1 層で作製できる SQUID 磁束計を開発した。まず、10mm 角の傾角 36.8° のバイクリスタル基板に PLD 法により 250nm 厚さの YBCO 薄膜を作製した。この膜の T_c はおよそ 90K であった。次に、フォトリソグラフィ技術と Ar イオンミリング法を用いて、作製した膜上にパターンニングを行った。Fig.11(a) に磁束計の全体を Fig.11(b) に素子部分の拡大写真を示す。この SQUID 磁束計の磁界検出コイルは 2.7mm × 2.7mm のホールを有する 8.1mm × 8.1mm の正方形のコイルである。検出コイルを流れる遮蔽電流を SQUID 本体の一部に流すことによって SQUID と結合させるダイレクトカップリング方式を採用した^{12,13)}。本方式は積層構造を用いないで作製できるため、高温超電導 SQUID 磁束計によく用いられている。作製した SQUID の電流-電圧特性および磁束-電圧特性の測定を磁気シールドケース内で測定した。その結果臨界電流 I_c と常抵抗 R_n は 10μA および 7Ω であった。外部磁束による変調深さは

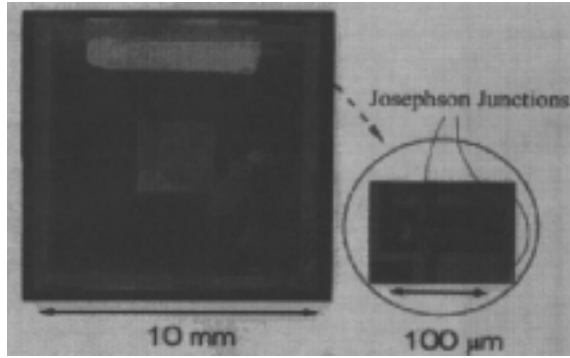


Fig.11 HTS-SQUID magnetometer.
 (a) HTS-SQUID magnetometer. The pick-up coil is directly coupled to SQUID.
 (b) the part of SQUID loop.

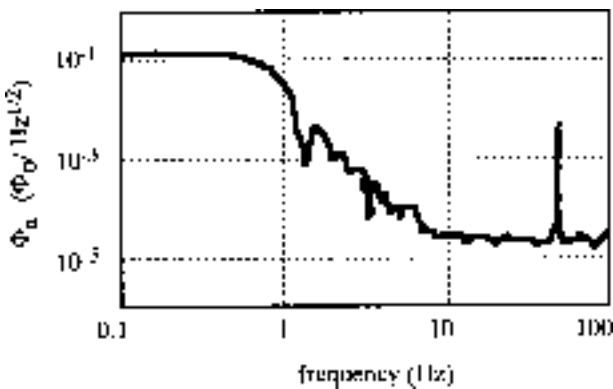


Fig.12 Noise spectrum of the HTS-SQUID magnetometer.

Table 2 Parameters and characteristics of the SQUID for nondestructive evaluation

SQUID inductance	50 nH
pick-up coil inductance	4.2 nH (5.1x5.1 mm ²)
junction Ic	4000 A/cm ²
resistance stage	20 kV Φ ₀
flux noise	1.5 (10 ⁻³ Φ ₀) / (Hz) ^{1/2} (10 ⁻³ Φ ₀)
field resolution	50 pT (Hz) ^{-1/2} (10 ⁻³ Φ ₀)
start of 1/f noise	10 Hz

20μVであった。SQUIDの遮蔽変数β_Lは0.48と推定された。また、磁気シールドケース内で測定された、77 Kにおける雑音特性をFig.12に示す。10 Hz 附近から1/f 雑音の立ち上がりが見られる。dc SQUIDの性能とパラメータをTable 2にまとめて示す。作製したSQUID磁束計の感度は非破壊検査に応用するには十分であることが分かった。

SQUIDを計測に応用するとき、その性能だけでなく信頼性が重要である。高温超電導SQUIDは経年劣化とくに室温と冷却温度との熱サイクルによる劣化が問題となるこ

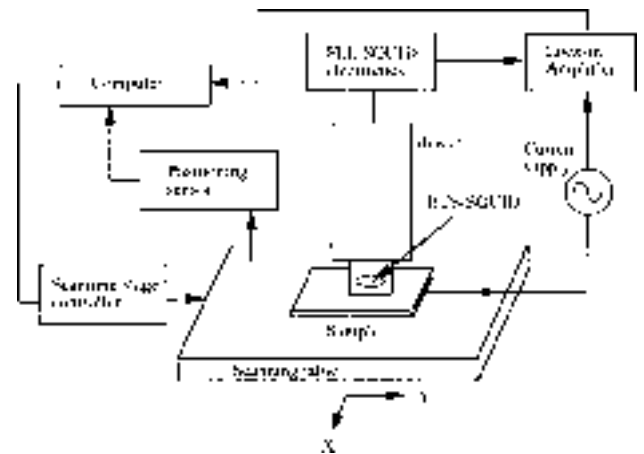


Fig.13 Diagram of non-destructive evaluation system with HTS-SQUID.

とが多い。これまでに対策としてSQUIDをモールドすることがなされている。非破壊検査に適用する場合で空間分解能を高くとりたい場合にはモールド部の厚みを薄くすることが必要となる。そこでレジストをSQUID表面にコーティングすることによって劣化を防げことを試みた。これによって、1年間の10回以上の熱サイクルによって、SQUIDの雑音性能が劣化しないことを確認した。

作製したSQUID磁束計をセンサとして、非破壊検査システムの開発を行った。Fig.13に開発した非破壊検査システムの概略図を示す。傷検査の空間分解能を高くするために、底部が3mmの液体窒素用クライオスタットを開発した。試料導体に電流を流すと、傷の部分で電流の流れが乱れるため、電流によって発生する磁場分布にも乱れが生じる。この乱れを観測することによって、傷の有無や位置を検出することができる。例として、航空機に用いられているCFRP(carbon fiber reinforced plastic)に開けた穴の検出結果を以下に示す。試料全体に流れる電流の影響を低減するため、Fig.14(a)に示すように、試料下に試料と同じ大きさの端子板を用いている。直径が2mmと3mmの穴が5cmの間隔で開けられた試料附近での磁界検出結果を3次元マップで表した結果をFig.14(b)に示す。正と負のピークの真中の位置に穴がある。ピークの大きさと直径との関係をFig.14(c)に示す。本システムを用いると、0.5 mmの穴まで検出可能であることが実験的に分かった。同図にアルミニウムの結果と有限要素法を用いて計算した結果も示してある。CFRPはアルミニウムや銅、ステンレスなどの結果と少し異なっているが、これはCFRPがカーボン繊維の織り物であることが影響していると思われる。

実際の傷検査は磁気雑音の多い現場で行われる。現場でSQUIDを使用するにはこの磁気雑音を低減することが不可欠であるが、それには微分型検出コイルをもつSQUID磁束計(グラジオメータ)を開発しなければならない。今

後、開発したCMPを用いた積層薄膜作製技術を用いて、高性能なSQUIDグラジオメータを作製する予定である。

§ 6 おわりに

パルスレーザー蒸着法による結晶性、電気的特性とともに高品質な酸化物超電導薄膜作製技術、およびフォトリソとエッチング技術を組み合わせた、加工過程における超電導特性の劣化を伴わない薄膜加工技術を開発した。さらに小規模回路に応用するための粒界接合型bicrystal ジョセフソン素子作製技術を開発した。これを用いて、bicrystal素子を利用した非破壊検査のためのdc SQUIDを試作し、液体窒素温度にてアルミニウム、銅、ステンレス鋼、CFRP各板の傷検査の可能性を実証した。

今後、SQUIDの広い応用を考えると、酸化物超電導薄膜の積層構造を持つデバイス作製が不可欠であるが、今回開発したCMP研磨を利用した積層構造作製技術により、高い絶縁抵抗率と超電導特性をもつ高品質な多層構造デバイス作製の可能性を明らかにした。

高温超電導に限らず超電導エレクトロニクスの応用は、小規模計測応用が実社会に普及し、超電導エレクトロニクス産業が立ち上がることが、大規模応用に必要な技術確立の前提として最も重要なことであると思われる。この観点から、高温超電導SQUIDを利用した小規模計測技術は、有力な候補といえる。高温超電導SQUIDは冷却が簡単になるため、手軽に、専門家でない誰でもが利用できるようになる。このことから、従来の金属超電導SQUIDの主たる応用分野である生体磁気計測のように最高性能をフルに利用する分野ばかりでなく、非接触での使用、低周波感度が高いなど他のセンサに比べて優れた特徴を活かした応用分野が今後開拓されていくことが期待される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり共同研究を行って下さった、STAフェロー G.A. Alvarez、科技庁特別研究員 鈴木大介、NEDOフェロー 尾川智也各氏に感謝いたします。また多大な御助力と適切な御助言を頂いた室蘭工業大学 松田瑞史助教授、北海道大学 栗城真也教授、日本女子大学 黒沢格教授に感謝いたします。さらに、実験に協力していただいた卒研 生、宮本勝彦さんと大峰理夏子さんに感謝します。CMP技術に関して親切な御指導と御助力をいただいた当研究所、材料科学部 寺田教男主任研究官に感謝いたします。

最後に有益な御討論、御助力と暖かい励ましをいただきました当研究所基礎計測部 遠藤 忠部長、柏谷 聡主

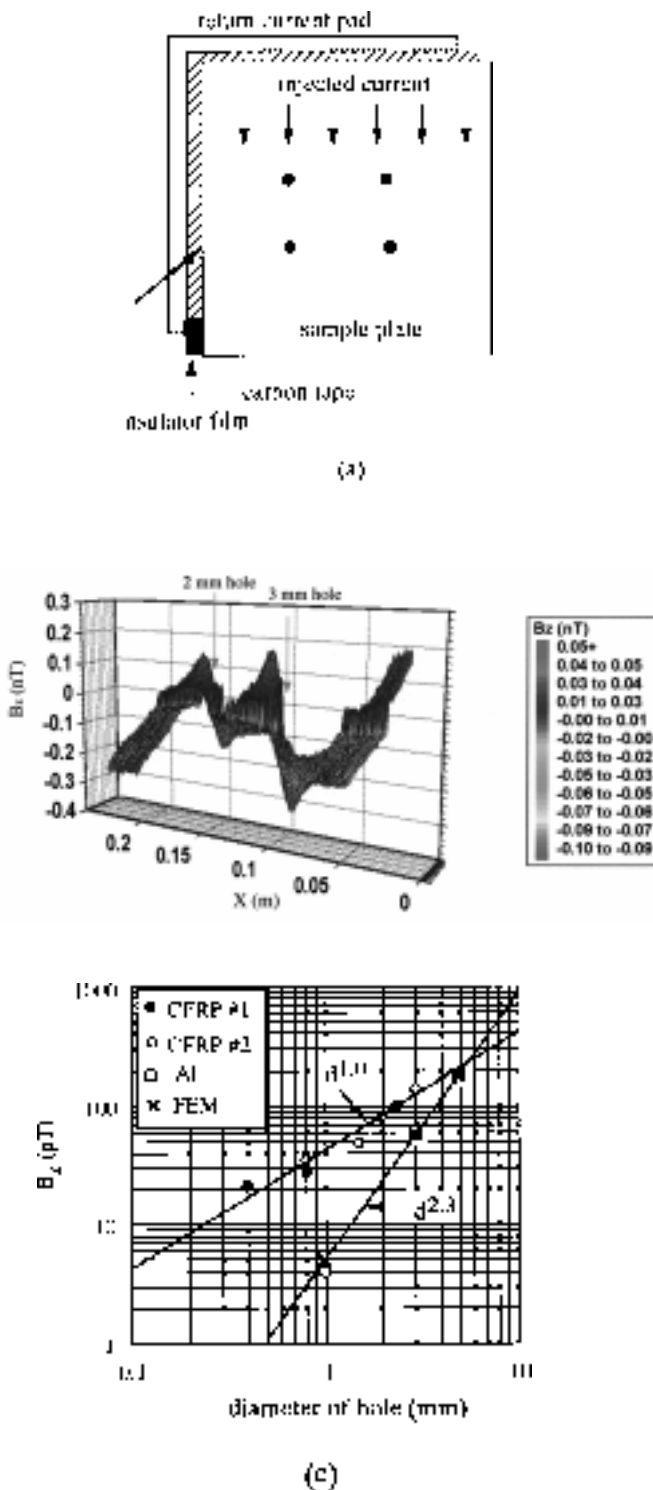


Fig.14 Non-destructive detection of holes made in CFRP plate.
 (a) Configuration of sample. A return current pad is used to pick up only the magnetic signals from holes.
 (b) 3 dimensional map of magnetic flux density constructed from the measured data.
 (c) Dependence of the peak height in the 3 dimensional map on the hole diameter.

任研究官,平山文紀主任研究官,電子デバイス部 坂本統徳部長,東海林 彰主任研究官,電子基礎部 清水 肇部長に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Principles and Applications of Superconducting Quantum Interference Device, ed. A. Barone (Wiley-Interscience Publ., New York, 1992)
- 2) 脳磁気科学—SQUID 応用と医学応用—: 原 宏・栗城真也共編 (オーム社, 東京, 1997)
- 3) G. B. Donaldson, A. Cochran and R. M. Bowman: The New Superconducting Electronics, eds.H. Weinstock and R. W. ralston (Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 1993) Chap.6.
- 4) 葛西直子: 応用物理, 67 (1998) 417.
- 5) F. C. Wellstood, Y. Gim, A. Amar, R.C. Black and A. Mathai: IEEE Trans. Applied Superconductivity, 7 (1997) 2526.
- 6) F. C. Wellstood, J. J. Kingston, and John Clark : J. Appl. Phys., 75 (1994) 683.
- 7) M. S. Dilorio, S. Yoshizumi, K. Y. Yang, M. Maung, J. Zhang, and B. Powe: IEEE Trans. Appl. Supercond., AS-3 (1993) 2011.
- 8) D. Grundler, B. David, R. Eckart, and O. Doessel: Appl. Phys. Lett., 63 (1993) 2700.
- 9) M. D. Strikovsky, E. B. Klyuenkov, S. V. Gaponov, J. Schubert, and C. A. Copetti: Appl. Phys. Lett., 63 (1993) 1146.
- 10) H. Q. Li, R. H. Ono, L. R. Vale, D. A. Rudman, and S. H. Liou: Appl. Phys. Lett., 69 (1996) 2752.
- 11) A. P. Marathe, T. Van Duzer, and L. P. Lee: IEEE Trans. Appl. Supercond., 7 (1997) 3834.
- 12) M. Matsuda, Y. Murayama, S. Kiryu, N. Kasai, S. Kashiwaya, M. Koyanagi, T. Endo, S. Kuriki: IEEE Tran. Magn., 27 (1991) 3043.
- 13) R. Canter, L. P. Lee, M. Teepe, V. Vinetskity, J. Longo: IEEE Tran. Applied Superconductivity, 5 (1995) 2927.
- 2) G.A.Alvarez 他: Fabrication and Characterization of Ramp Edge-Type Junction and SQUIDs, IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, vol.5 (1995) 2755-2758.
- 3) 宮本勝彦他: 配線としての YBCO/STO/YBCO 構造の上部・下部電極の評価, 進学技報 SCE95-37 (1996) 7.
- 4) 鈴木大介他: Study of nondestructive evaluation using HTS SQUID, International Superconductivity Symposium in Sapporo, 1996.10.
- 5) 尾川智也, 小柳正男: Relation between the cooling time in the film-growth process of YBCO and the electrical properties of bicrystal Josephson junctions, Applied Physics Letters Vol.70 no.16 (1997) 2183-2185.
- 6) 鈴木大介, 葛西直子, 大峰理夏子*, 小柳正男, 黒沢格* (* 日本女子大学): HTS-SQUID System for Nondestructive Evaluation, Extended Abstracts of The 5th International Workshop on High-Temperature Superconducting Electron Devices, pp96-98, 1997.5
- 7) 高島 浩, 林 邦彦, 鈴木大介, 寺田教男, 小柳正男: Fabrication of HTS-thin film multilayer structure using chemical mechanical planarization, ISEC97 Extended Abstracts Vol.3 pp37-39, 1997.6.27
- 8) 林 邦彦, 高島 浩, 鈴木大介, 横山侑子, 桑野*, 川辺*, J.Lee** (* 千葉工業大学, ** ソウル大学): Growth and properties of GdBaCuO and NdBaCuO thin films for electronic device
- 7) Rashdi S Ahmad*, 横澤宏一*, 丸山恵美*, 久保真輝*, 栗城慎也*, 松田瑞史**, 鈴木大介, 小柳正男 (* 北海道大学電子科研究所, ** 室蘭工業大学): Direct Coupled Single Layer High Tc SQUIDs, Extended Absuracts of 5th International Workshop on High Temperature Superconducting Electronics, pp99-101, Matsuyama, 1997.5
- 9) Rashdi S Ahmad*, 横澤宏一*, 丸山恵美*, 久保真輝*, 栗城慎也*, 松田瑞史**, 鈴木大介, 小柳正男 (* 北海道大学電子科研究所, ** 室蘭工業大学): Resonance Structure due to Parasitic Capacitance in High-T_c SQUIDs, Extended Absuracts of 6th International Superconductive Electronics Conference, Vol.3 pp45-47, Berlin, 1997.6.
- 10) 横澤宏一*, **, Rashdi S Ahmad*, 丸山恵美*, 栗城慎也*, 鈴木大介, 小柳正男 (* 北海道大学電子科研究所, ** 日立製作所中央研究所): Design and Basic Experiments of Single-Layer High-Tc SQUID Magnetometer, Extended Absuracts of 6th International Superconductive Electronics Conference, Vol.3 pp7-9, Berlin, 1997.6
- 11) 林 邦彦, 高島 浩, 鈴木大介, 横山侑子, 桑野*,

[発表論文リスト]

- 1) G.A.Alvarez 他: Structural and morphological characterization of high quality YBa₂Cu₃O_x epitaxial films by atomic force and high resolution scanning electron microscopies, Cryogenics, vol.35 (1995) 361-366.

- 川辺 * , J.Lee**(* 千葉工業大学 , ** ソウル大学) :
Growth and properties of GdBaCuO and NdBaCuO thin
films for electronic device application, ISEC97 Extended
Abstracts, Vol.2 pp204, 1997.6
- 12) 尾川智也 * , 小柳正男 (* 新機能素子協会) : Effect of
the Cooling Time in YBCO Film-Growth Process on
Grain Boundary Josephson Junctions for Small-Scale
Circuits, IEEE Transactions on Applied
Superconductivity, Vol.7 no.2 pp3319-3322
- 13) 横澤宏一 * , ** , Rashdi S Ahmad* , 丸山恵美 * , 栗城
慎也 * , 鈴木大介 , 小柳正男 (* 北海道大学電子科研究
所 , ** 日立製作所中央研究所) : Double pickup-coil 型
High-Tc SQUID 磁束計における検出コイル及び
SQUID 形状の実験的検討 , 電子情報通信学会技術研
究報告 , SCE97-25, pp25-30, 1997
- 14) 尾川智也 * , 宮本克彦 ** , 鈴木大介 , 葛西直子 , 小柳
正男 (* R&D Association for Future Electron Devices,
** 千葉工業大学) : Optimization of Bicrystal Josephson
Junctions for Small-Scale Circuits, Advances in
Superconductivity IX (1998) pp1187-1190
- 15) 葛西直子 : 超電導量干渉素子による材料の非破壊評
価 , 応用物理 67 巻 , 4 号 , pp417-423, 1998
(1999. 2.18 受付)